

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a Informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016

Kryštof Benatzky

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Sourasné trendy v oblasti elektrických obloukových pecí
Current Trends in Electric Arc Furnaces

2016

Kryštof Benatzky

Zadání bakalářské práce

Student:

Kryštof Benatzky

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Současné trendy v oblasti elektrických obloukových pecí
Current Trends in Electric Arc Furnaces

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky elektrických obloukových pecí (EOP), historie, typy elektrických obloukových pecí
2. Kritéria pro hodnocení režimu EOP, možnosti intenzifikace taveb EOP
3. Možnosti úspor nákladů a energie, aktuální trendy

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Hradílek, Z., Lázníčková, I., Král, V. Elektrotepelná technika, Praha: ČVUT Praha, 2011, ISBN 978-80-01-043938-9
- [2] Hradílek, Z. a kol. Elektrotepelná technika. Simulace - počítačové programy, skriptum, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2001
- [3] Michálek, K. Elektrometalurgie a výroba feroslitin, studijní opora, VŠB-TU Ostrava, 2008
- [4] Hradílek, Z. a kol. Elektrotepelná zařízení, Praha: IN-EL Praha, 1997
- [5] Rada, J. a kol. Elektrotepelná technika, Praha: SNTL Praha, 1985
- [6] Gavlas, J., Žídek, J. Elektrické teplo - návody do cvičení, skriptum, Ostrava: VŠB Ostrava, 1990

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

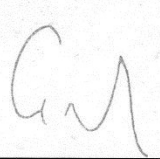
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Král, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení

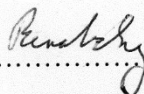
Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Vladimíru Královi, Ph.D. za rady a pomoc během vypracovávání práce. Také děkuji své matce, Pavle Benatzké za podporu během celé doby studia.

29.4.2016

.....
Datum odevzdání


.....

Podpis studenta

Abstrakt

Tato práce je teoretickou studií o moderních technologiích elektrických obloukových pecí. Na začátku práce popisuje základní údaje o historii, typech a konstrukci těchto pecí. Dále popisuje metody používané k optimalizaci výroby. V závěrečné části uvádí v současnosti nejpoužívanější technologie pro intenzifikaci výroby a úsporu elektrické energie.

Klíčová slova

Elektrický oblouk, elektrická oblouková pec, transformátor, intenzifikace tavby, optimalizace provozu, kyslíko-palivový hořák, pěnivá struska, JET modul

Abstract

This thesis is a theoretical study of modern technologies in electric arc furnaces. In the beginning it gives basic data about history, types and construction of these furnaces. Next it describes methods used for production optimization. The last part states currently most used technologies for intensification of production and savings of electric energy.

Key words

Electric arc, electric arc furnace, transformer, melting intensification, operation optimization, oxygen-fuel burner, foamy slag, JET module

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Historický vývoj EOP	2
3	Elektrický oblouk	3
3.1	Střídavý oblouk	3
3.1.1	Stabilizace střídavého oblouku	3
4	Druhy EOP	5
4.1	Pece s přímo působícím obloukem	5
4.2	Pece s nepřímo působícím obloukem	5
4.3	EOP na vakuové tavení.....	6
4.4	Indukčně obloukové pece	6
4.5	Ocelářské EOP	6
5	Konstrukce Elektrických obloukových pecí	7
5.1	Elektrický obvod EOP	8
5.1.1	Připojení pecí k síti Vysokého napětí.....	8
5.1.2	Pecní transformátory.....	9
5.1.3	Tlumivky	10
5.1.4	Krátká cesta	10
5.1.5	Elektrody	11
6	Určování režimu elektrické obloukové pece.....	12
6.1	Kružnicový diagram vycházející z diagramu impedancí	12
6.2	Kružnicový diagram vycházející ze zkratových proudů	13
6.3	Určování účinníku $\cos\varphi$	13
6.4	Určování elektrické účinnosti η	14
6.5	Pracovní charakteristiky	14
6.6	Pracovní oblast kružnicového diagramu	15
7	Metody intenzifikace taveb	16
7.1	Kyslíkovo-palivové hořáky	16
7.2	JET moduly	17
7.3	Dospalování CO v peci.....	18
7.4	Technologie Closed Door Process	19
7.5	Technologie pěnivé strusky	19
8	Metody úspory energie během tavby	20
8.1	Zlepšení regulace tavby	20
8.1.1	Příklady z praxe	20
8.2	Zvýšení výkonu	20
8.2.1	Příklady z praxe	20

8.3	Adjustable speed drives (ASD).....	21
8.4	Míchání u dna pomocí plynu	21
8.5	Vstřikování odpadu	21
8.6	Předhřívání vsázky	21
8.6.1	Metoda Consteel	22
8.7	Vzduchotěsný provoz	23
9	Závěr	23

1 Úvod

Ocel vždy byla jedním z nejdůležitějších materiálů pro lidstvo a od vynálezu elektrické obloukové pece jejich podíl na výrobě oceli neustále roste. Dnes se v EOP vyrobí více, než 1/3 veškeré oceli. Tyto pece se vyznačují velkou flexibilitou výroby, největší pece jsou konstruovány i na 300 tun vsázky, stejně dobře však fungují malé pece např. na 3 tuny. Jejich nevýhodou je však značná spotřeba elektrické energie a její dlouhodobě rostoucí cena. Proto se dnes klade značný důraz na optimalizaci taveb a možnosti úspory elektrické energie, kterými se zabývá i tato práce.

Způsoby omezení ceny výroby mohou být ekonomické, nebo technické. Technickými způsoby rozumíme zvyšování celkové účinnosti pece pomocí optimalizace tavy, modernizace zařízení nebo výměnou celé pece. Ekonomické snižování ceny výroby spočívá ve výhodně dohodnutých hodinových odběrech a čtvrt hodinových maximech.

Tato práce se zabývá technickými způsoby úspory elektrické energie, optimalizace provozu a intenzifikace tavy.

2 Historický vývoj EOP

Elektrický oblouk poprvé popsal roku 1803 ruský vědec V.V. Petrov. Roku 1810 brit H.Davy, člen Královské vědecké společnosti v Londýně, prováděl pokusy s elektrickým obloukem ve zředěné atmosféře, své poznatky uveřejnil roku 1812. Během pokusů se mimo jiné pokoušel získat čisté kovy z jejich oxidů pomocí elektrického oblouku. Dalším mezníkem ve výzkumu elektrického oblouku byla práce britky H. Ayrtonové z roku 1902, která popisuje základní jevy elektrického oblouku a částečně je matematicky vysvětluje.

Výrobě většího množství kovu bránil hlavně fakt, že neexistoval jiný zdroj proudu, než elektrochemické články. Až vynález dynama umožnil sestrojení většího zařízení s přímým působením oblouku na vsázku. První elektrickou obloukovou pec sestrojil roku 1879 W. Siemens. Pec využívala stejnosměrný proud a její vsázka byla jen 10kg.

Nejvýznamnější vynálezce a konstruktér obloukových pecí je francouz P. Héroult. Ten v roce 1899 sestrojil první průmyslově použitelnou pec s přímým působením elektrického oblouku. Jeho pece byly většinou napájeny střídavým proudem, jen pece na výrobu surového železa a hliníku byly na stejnosměrný. Héroultovy pece používaly taveninu pouze jako vodič proudu mezi elektrodami, takže elektrické oblouky v peci hořely v sérii.

Dalším významným konstruktérem byl P. Girod, který roku 1902 sestrojil pec s nístějí, kterou procházela jedna nebo více vodou chlazených elektrod. Oblouk tedy hořel mezi elektrodami a taveninou paralelně. Tyto pece se lépe regulovaly a využívaly kromě obloukového tepla i odporové vznikající průchodem elektrického proudu vsázkou. Nístěje pecí však měly špatnou trvanlivost, proto se od nich postupně upouštělo.

První pec využívající pouze tepla vyzařovaného obloukem, ve které oblouk hoří pouze mezi elektrodami a nepříjde do kontaktu se vsázkou vynalezl W. Siemens roku 1879. Elektrody do pece vstupovaly z boku a nádoba na vsázku byla nevodivá.

První EOP u nás byla postavena na Kladně roku 1912 italskou firmou FIAT. Pec měla obsah 3 tuny a výkon transformátoru 950 kVA.

3 Elektrický oblouk

Elektrický oblouk je výboj hořící v plynu, schopný samostatné existence libovolnou dobu, pokud jej nepřerušíme zásahem do jeho mechanismu.

Obloukový výboj se vyznačuje těmito znaky:

- Vysoká teplota katody (asi 5000°C), dostatečná k tepelné emisi elektronů – tepelné ionizaci.
- Vysoká hustota proudu katodové skvrny (desítky MA/m^2)
- Malé napětí a velký proud mezi elektrodami

Aby mohl proud plynem procházet, musíme zajistit ionizaci plynu. Toho lze dosáhnout několika způsoby (vysokou teplotou, elektrickým polem, radioaktivním, nebo elektromagnetickým zářením).

Velký vliv na charakteristiku oblouku má to, jestli je napájen střídavým, nebo stejnosměrným zdrojem.

Stejnosměrný oblouk sice hoří lépe, než střídavý, ale v praxi se nepoužívá ze stejných důvodů, jako v ostatních odvětvích elektrotechniky (špatná transformace)

3.1 Střídavý oblouk

Vzniká oddálením elektrod, kterými prochází proud, nebo překročením průrazného napětí prostředí. Problém při hoření střídavého oblouku pro EOP je, že se dvakrát za periodu změni polarita napětí a proudu, tedy i střídání toho, zda je tavená vsázka anodou, či katodou. Anoda se ochlazuje, zatímco katoda se ohřívá.

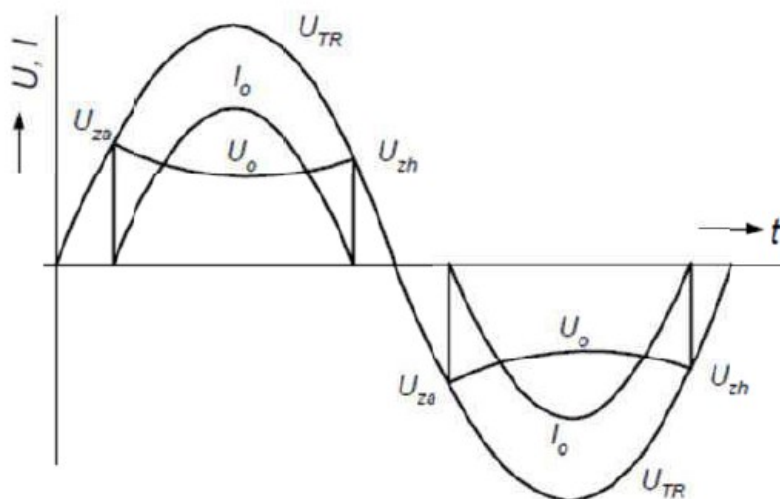
S rostoucím proudem potřebuje oblouk nižší napětí, protože se elektrody působením proudu ohřívají a uvolňují více elektronů do okolí a ionizují ho. Střídavý oblouk je velmi nestabilní, pro jeho správné hoření potřebujeme předřadný elektrický člen.

Většinu tepla oblouk vyzáří do okolí, jen asi 5% svého tepelného výkonu předá elektrodám.

3.1.1 Stabilizace střídavého oblouku

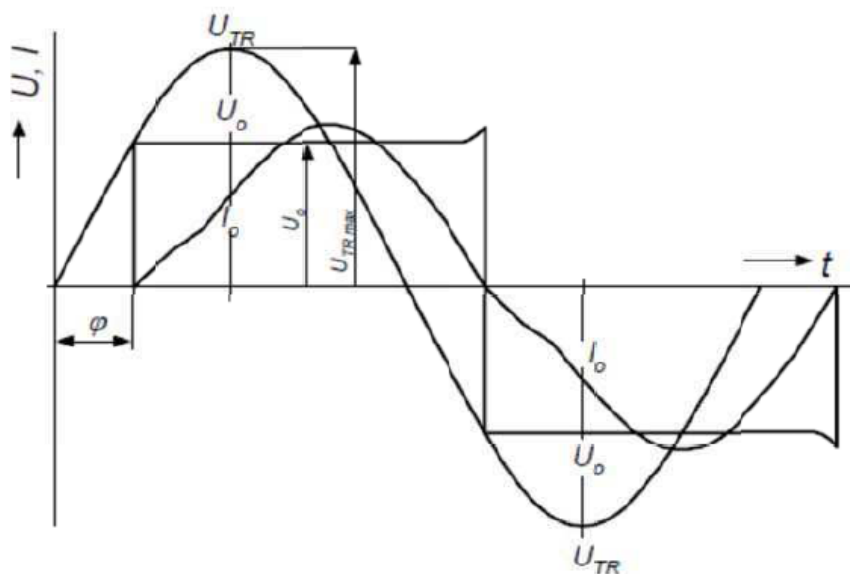
Aby oblouk správně hořel, zařazujeme do obvodu indukčnost, většinou tlumivku se železným jádrem. Velká indukčnost může příliš snížit účinník obvodu, ten by měl mít hodnotu přibližně $\cos\varphi=0,85$. Tento jev je dobře patrný z charakteristik oblouku.

Statická charakteristika zobrazuje vzájemnou závislost proudu a napětí oblouku, dynamická charakteristika zobrazuje závislost obou těchto veličin na čase. V charakteristikách nás zajímá hlavně napětí, při kterém dojde k zapálení a ke zhasnutí oblouku (zápalné a zhášecí napětí), přičemž tato napětí nejsou stejná. Ve střídavých obvodech je významnější dynamická charakteristika, protože statická předpokládá pozvolnou změnu napětí, ke které zde nikdy nedojde. Obecně platí, že zápalné napětí je vyšší, než zhášecí, tvar charakteristiky však ovlivňuje více faktorů.



obr. 2.1 – Charakteristika střídavého oblouku bez indukční zátěže

Na obrázku 2.1 vidíme dynamickou charakteristiku nestabilizovaného oblouku, kde U_{TR} =Napětí na pecním transformátoru, U_o =Napětí na oblouku, U_{za} =zaplovací napětí oblouku, U_{zh} =zhášecí napětí oblouku, I_o =Proud oblouku. Z charakteristik je zřejmé, že nestabilizovaný oblouk zhasíná dvakrát za periodu a k jeho opětovnému zapálení dojde až za relativně dlouhou dobu.



obr. 2.2 – Charakteristika střídavého oblouku stabilizovaného indukčností

Zapojení indukčnosti do obvodu vede k fázovému posunu proudu za napětí o hodnotu φ , díky čemuž hoří oblouk nepřetržitě. a zhasíná jen na moment, kdy prochází nulou.

4 Druhy EOP

Podle způsobu, kterým pec ohřívá vsázku, dělíme EOP na pece s přímo působícím obloukem (ty se dále dělí na pece se zakrytým / odkrytým obloukem a pece s vodivou / nevodivou nístějí), pece s nepřímo působícím obloukem, pece na vakuové přetavování a indukčně obloukové pece.

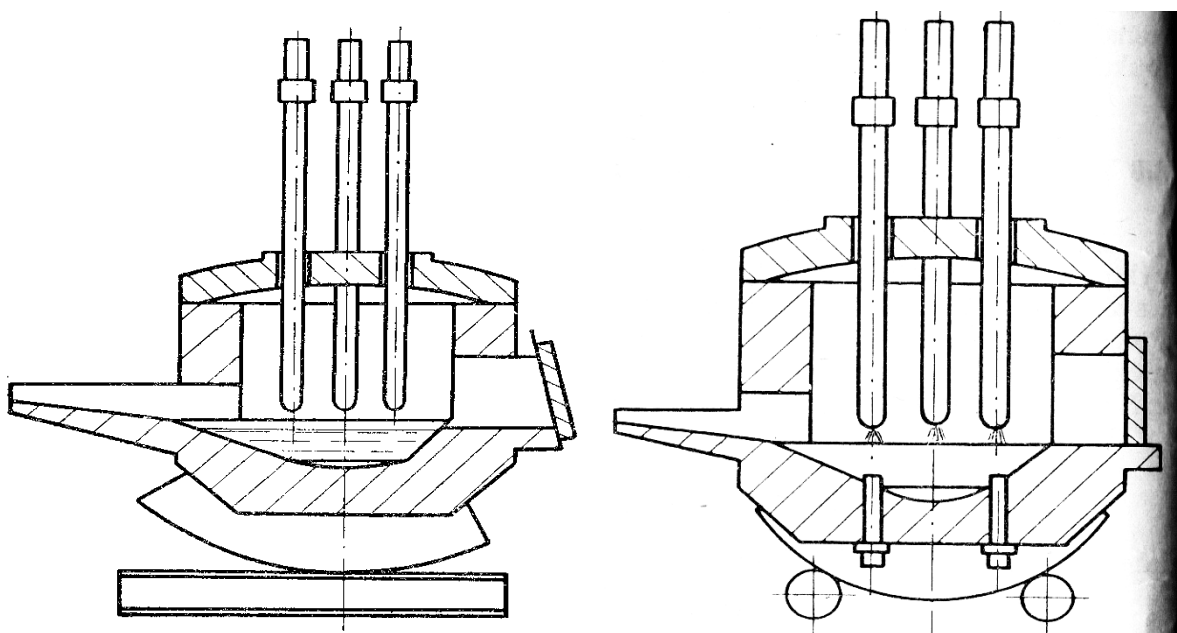
Podle účelu můžeme EOP rozdělit na ocelářské nebo rudně termické.

4.1 Pece s přímo působícím obloukem

V těchto pecích se elektrický oblouk vytváří mezi elektrodou a lázní, oblouk lázeň ohřívá přímo. Díky tomu předává vsázce větší množství tepla a roztaví ji rychleji, než pece s nepřímo působícím obloukem. Také vyzdívka a klenba pece mají delší životnost, protože nejsou v kontaktu s obloukem a tepelné ztráty těchto pecí bývají nižší, než u nepřímo působícího oblouku. Elektrody jsou v peci uspořádány svisle, díky tomu jsou méně mechanicky namáhány, lze je lépe utěsnit a mají snadnější údržbu.

U pece s nevodivou nístějí proud prochází z jedné elektrody přes strusku do taveniny, pak zpět struskou do elektrody, oblouk se tvoří na vstupní i výstupní elektrodě, proud neprochází dnem pece. Toto uspořádání je nejčastější. Pece s vodivou nístějí mají na dně tzv. podlažní elektrodu, proud prochází obloukem z elektrody do strusky a taveniny, dále teče ke dnu a spodní elektrodě. Rozložení proudu je tedy mnohem rovnoměrnější, než v peci s nevodivou nístějí, lázeň se tak ohřívá zezhora i zezpoda, což vede ke stejnoměrnější tavbě. Navíc v nich dochází k určitému pohybu lázně, což urychluje chemické reakce. Mají však nižší výrobnost a je u nich značné riziko protavení dna, proto se přestaly používat.

U pecí se zakrytým obloukem hoří oblouk pod vrstvou vsázky, která obklopuje elektrodu. Vsázka se tak ohřívá nejen obloukem, ale i Joulovým teplem vznikajícím při průchodu proudu vsázkou. V pecích s odkrytým obloukem hoří oblouk nad vsázkou.



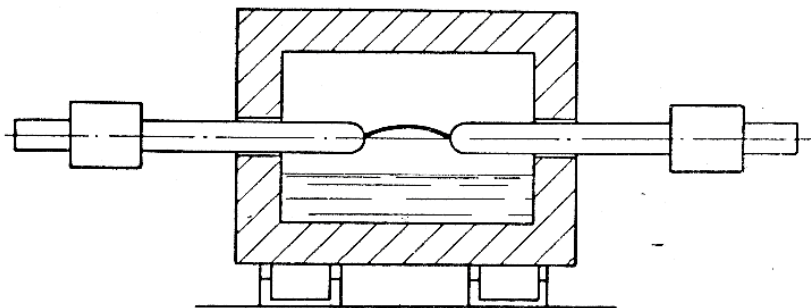
obr. 3.1 – Schéma pecí s nevodivou a s vodivou nístějí

4.2 Pece s nepřímo působícím obloukem

Tyto pece předávají vsázce teplo sáláním, oblouk v nich hoří jen mezi elektrodami a proud neprochází vsázkou. Mají však několik nevýhod. Mohou tavit jen malé obsahy, protože jejich zdroj tepla se blíží bodovému, musí mít vsázka co nejmenší povrch. Efektivita tavby těchto pecí je nižší a často dochází

k lámání elektrod. Protože oblouk předává teplo jen povrchu vsázky a dál se šíří vedením, je tavba poměrně zdlouhavá. Vyzdívka pece navíc trpí volným hořením oblouku uprostřed pecní nádoby.

Výhody těchto pecí je jejich nízká cena jednotek malých výkonů, pružnost provozu, jednoduchá obsluha a fakt, že se kov nepřehřívá, což je výhodné zvláště při zpracování neželezných kovů. Vyrábějí se do obsahu 3 tun.



obr. 3.2 – Schéma pece s nepřímo působícím obloukem

4.3 EOP na vakuové tavení

Používají se pro výrobu vysoce kvalitních kovů a slitin s malým obsahem plynů a nekovových nečistot. Tavba probíhá v inertní atmosféře, nebo ve vakuu. Pece jsou buď s odtavnou elektrodou, nebo s chlazenou wolframovou elektrodou.

Pece s odtavnou elektrodou používají jako elektrodu kov nebo slitinu, které chceme tavit, v pecích s chlazenou wolframovou elektrodou hoří oblouk mezi touto elektrodou a vsázkou, tu přisypáváme během tavení v podobě jemnozrného prášku. U obou typů tavený kov stéká do měděného krystalizátoru chlazeného vodou, kde tuhne v ingot.

4.4 Indukčně obloukové pece

Reakce kovu se struskou jsou v tomto druhu pece značně urychleny indukčním promícháváním lázně pomocí tří chlazených pólů a cívek nízké frekvence, uspořádané po 120°. Pece mohou být upraveny na tavbu s přímo nebo nepřímo působícím obloukem.

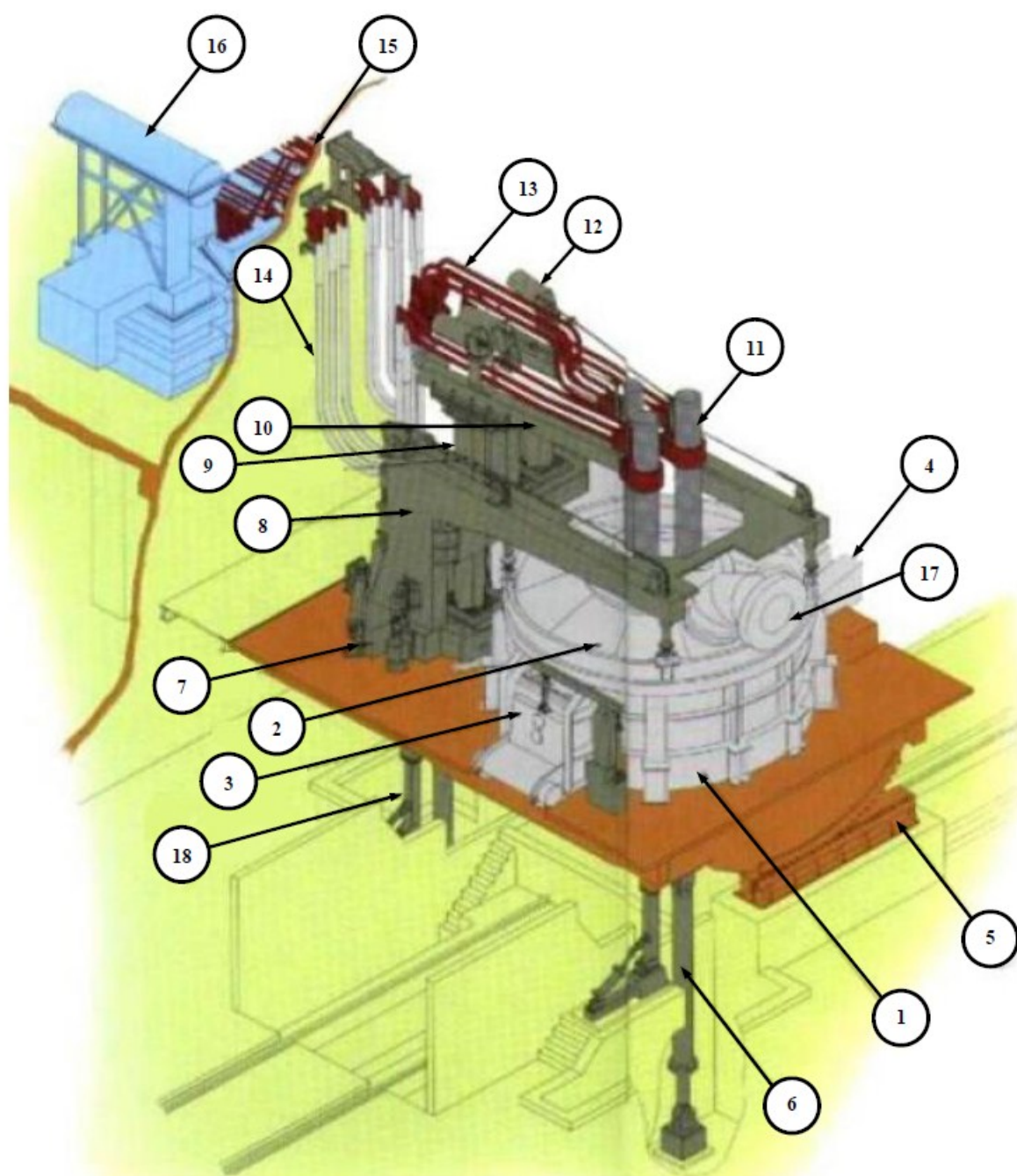
4.5 Ocelářské EOP

Jsou to pece pro přetavování surového železa v ocel.

Pecní vany mají zásaditou vyzdívku, obsah vsázky činí až 100 tun oceli. Elektrický příkon pecí může být až desítky MW. Jejich provozní režim je ovlivněn řadou faktorů jako je složení vyzdívky, konstrukce pece, nebo jakost elektrod, hlavně však elektrický režim pece, který používáme k regulaci tavby.

K regulaci elektrického režimu používáme buď změnu napětí na pecních elektrodách, nebo změnu délky oblouku a tím i jeho proudu. Regulace pomocí změny napětí se používá pro jednotlivé etapy tavby a přímo navazuje na metalurgický proces. Změna délky oblouku slouží k udržování konstantního, optimálního elektrického příkonu.

5 Konstrukce Elektrických obloukových pecí



1. pecní nádoba, 2. víko, 3. vsázezí dvířka, 4. odpichový otvor, 5. naklápění pece, 6. hydraulika naklápění, 7. stojan víka, 8. podpora víka, 9. zvedací mechanismus víka, 10. ramena elektrod, 11. elektrody, 12. držák elektrod, 13. vodou chlazené vodiče, 14. krátká cesta, 15. výstup z transformátoru, 16. transformátor, 17. odtahový otvor

obr. 4.1 – Základní části elektrické obloukové pece

5.1 Elektrický obvod EOP

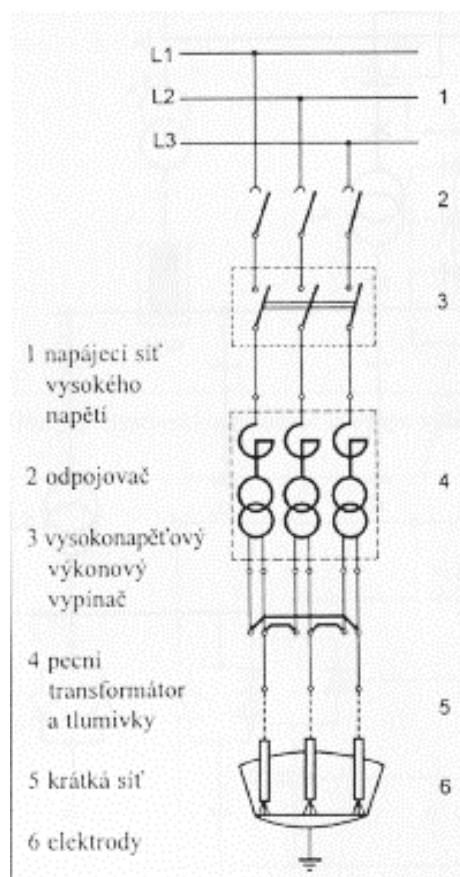
5.1.1 Připojení pecí k síti Vysokého napětí

EOP patří k největším odběratelům elektrické energie soustředěné do jednoho bodu rozvodné sítě závodu. Pece zatěžují síť nepravidelně od nulového odběru po špičky, dosahující až trojnásobku jmenovitého proudu. To může způsobovat kolísání napětí sítě a ovlivnit tak ostatní zařízení napájená z této soustavy. Na toto kolísání nejvíce trpí výpočetní technika. Z těchto důvodů musí napájecí síť splňovat určité požadavky dané především výkonem pecního transformátoru a způsobem tavy.

Velice důležitým činitelem je zkratový výkon sítě v místě připojení pece k napájení. Je třeba oddělit systém napájení EOP od ostatních zařízení, zejména těch citlivých na kolísání napětí. Ne všude však lze toto oddělení provést, převážně v menších závodech. Potom musíme výpočtem ověřit, jestli je síť během zkratu v místě připojení pece stále dostatečně stabilní. Nežádoucí účinky kolísání napětí mohou nastat už při odchylce 0,5% od jmenovitého napětí u 6-8 kmitů během vteřiny.

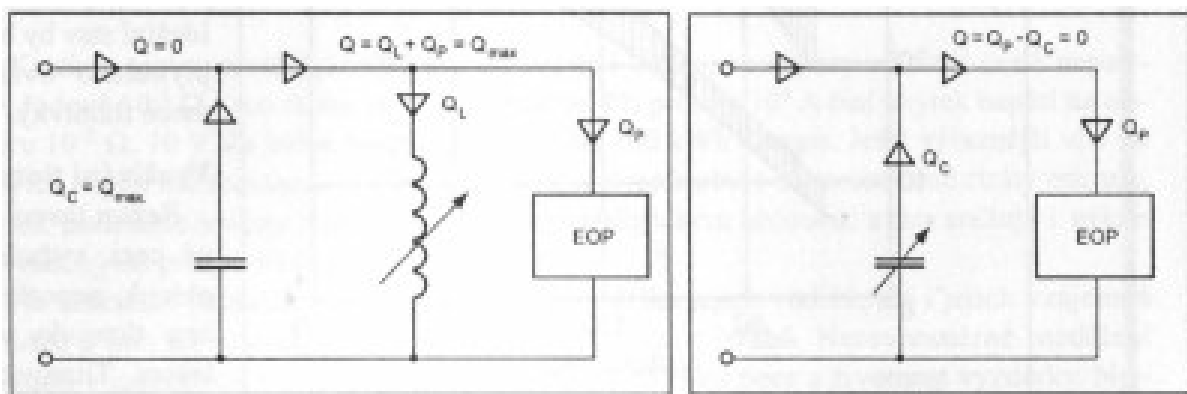
5.1.1.1 Snižování rušivých účinků EOP na napájecí síť

- Omezováním zkratových proudů: K největšímu kolísání napětí dochází při největších odběrech, právě tyto špičky se musíme snažit omezit. Tyto špičky nastávají při natavování vsázky. Do série s pecním transformátorem tedy zapojíme reaktor, který můžeme po natavení vsázky vyřadit. Také je možné provádět toto tlumení několikastupňově.
- Zvětšením zkratového výkonu v místě připojení: Zkratový výkon má velký vliv na kolísání napětí sítě. Podle výkonu pecního transformátoru můžeme zjistit požadovanou velikost zkratového výkonu v místě připojení pece a podle ní upravit síť. Zvýšení zkratového výkonu můžeme provést několika způsoby:
 - Zesílením sítě (zdvojení přívodů, vyšší výkony transformátorů, připojení nového generátoru). Tento způsob je sice nákladný, přesto se ale občas používá.
 - Připojením synchronního kompenzátoru do vhodného místa sítě.
 - Sériovou či paralelní kompenzací.
- Zmenšením kolísání jalového příkonu EOP: Toho lze dosáhnout dvěma způsoby. Můžeme udržovat jalový odběr konstantně na maximální hodnotě. Tím se sice vyhneme kolísání sítě, ale účinek systému bude trvale velice špatný. Proto častěji paralelně připojujeme statický kondenzátor s dostatečnou kapacitou, aby dokázal vykompenzovat celý jalový příkon. Tento způsob se nazývá nepřímá kompenzace. Pro nepřímou kompenzaci můžeme použít jako spotřebič proměnlivého induktivního výkonu řízený statický usměrňovač. Součet induktivní spotřeby pece a usměrňovače je konstantní a je kompenzován statickým kondenzátorem. Toto provedení je jednoduché, levné a i jeho dynamické vlastnosti jsou vyhovující. Druhým způsobem je přímá kompenzace. Při ní provádíme kompenzaci podle aktuálního odběru. Při přímé kompenzaci regulujeme výkon kompenzátoru podle aktuální spotřeby pece. Nemůžeme použít neregulovanou kondenzátorovou baterii, protože by při poklesu odebíraného proudu pece došlo k překompenzování systému. Kondenzátorovou baterii tedy můžeme použít



obr. 4.2 – Elektrický obvod EOP

jen ke kompenzaci stálé složky výkonu pece. Pro přímou regulaci používáme kondenzátorové baterie spínané tyristory.

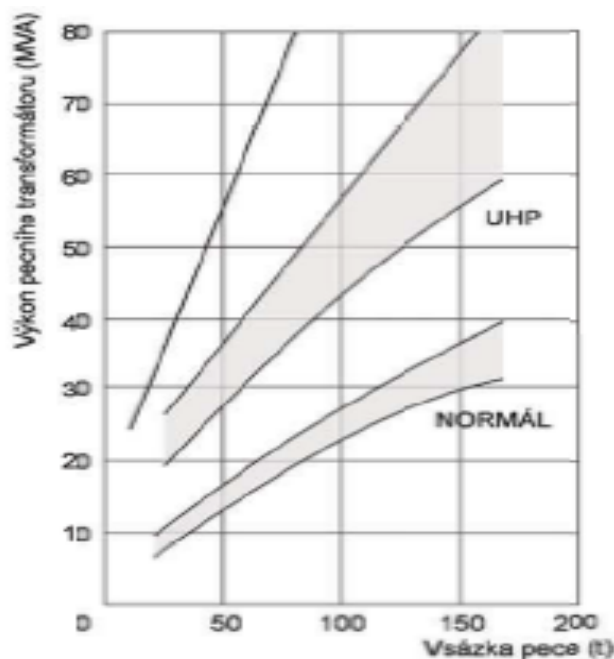


obr. 4.3 – Blokové schéma nepřímé a přímé kompenzace jalového výkonu

5.1.2 Pecní transformátory

Transformátory elektrických obloukových pecí nejsou stejné jako běžné silové transformátory. Musí být přizpůsobeny proměnlivému zatížení a častým zkratovým proudům, které se vyskytují při běžném chodu pece při dotyku elektrod se vsázkou. Charakteristické je pro ně nízké napětí a tedy vysoký proud sekundárního vinutí. Transformátory musí umožňovat široký rozsah regulace sekundárního napětí, protože požadavky na přívod energie se v průběhu tavby značně mění. Kvůli vysokým proudům sekundárního vinutí se tato regulace provádí na primárním vinutí měněním počtu závitů. Přepínáním zapojení primárního vinutí mezi hvězdou a trojúhelníkem nám navíc poskytuje dvě hladiny napětí. Většinou se používají transformátory s přepínáním napěťových stupňů při vypnutém výkonovém vypínači, složitější transformátory umožňují přepínání i při zatížení. Výkon pecního transformátoru definuje teplo přivedené do pece, tudíž i výkon pece. To má hlavní vliv na etapu natavování vsázky, protože potřebná doba je závislá na množství dodaného tepla. Výkon pecního transformátoru volíme podle velikosti vsázky a režimu pece.

Režim tavby s velmi vysokou produktivitou (UHP) se vyznačuje poměrně krátkým obloukem, a vyžaduje transformátor 2,1-2,4 krát výkonnější, než při normálním režimu. Transformátory pro pece se supravysokou produktivitou (SUHP) mají výkony přibližně 1 MVA na 1 tunu vsázky. Tyto pece jsou schopny roztavit vsázku do 1 hodiny.



obr. 4.4 – Porovnání výkonu při běžné a UHP tavbě

5.1.3 Tlumivky

Úkolem tlumivek v elektrických obloukových pecích je omezit zkratový proud při dotyku elektrod s taveninou. V obvodu jsou zapojeny mezi výkonovým vypínačem a pecním transformátorem. Nacházejí se ve stejné nádobě, jako transformátor a většinou jsou několikastupňové. Obvykle tlumivku využíváme při vyšších napětích, kdy je primární vinutí zapojeno do trojúhelníku a při přepnutí do hvězdy se tlumivka odpojuje. Režim tavby s krátkým obloukem tlumivku nevyžaduje vůbec a pokud jí je pec vybavena, slouží pouze k omezování amplitudy proudů vznikajících v prvních fázích tavby. V této době je tlumivka potřebná převážně kvůli ochraně napájecí sítě a zabraňuje kolísání jejího napětí. Z pohledu pece využívající krátký oblouk však tlumivka snižuje napětí a tedy i výkon pece.

Pece s dlouhým obloukem se jej snaží udržet co možná nejdéle při nejvyšším stupni napětí. Tím se snaží zkrátit dobu natavování vsázky využíváním maximálního výkonu transformátoru. Tento režim vyžaduje zapojení tlumivky. Jejich účelem je stabilizace hoření elektrického oblouku zvýšením fázového posuvu mezi proudem a napětím s předstihem proudu. Tlumivky zapojujeme v sérii s transformátorem a pecními oblouky.

Tlumivky však zhoršují celkovou účinnost pecí, proto se ve druhé fázi natavování, kdy je oblouk kratší a stabilnější pracuje v režimu se sníženou reaktancí či úplně odpojenou tlumivkou. Tento režim umožňuje vyšší výkon oblouku a tudíž urychlení tavby při současném snížení spotřeby energie. Potřebujeme k tomu však tlumivku umožňující regulaci indukčnosti a její odpojení.

5.1.4 Krátká cesta

Krátká cesta je elektrické vedení od vývodů sekundárního vinutí pecního transformátoru do pracovního prostoru pece. Konstrukčně se mohou krátké cesty lišit, vždy však obsahují tyto části:

- pásovou část
- ohebná lana
- vodiče ramen držáků elektrod
- držáky elektrod
- elektrody a spojky

Protože krátkou cestou protékají velké proudy, vznikají v ní velké ztráty přes její malý ohmický odpor. Ještě větším problémem je reaktance krátké cesty. Ta nezpůsobuje ztráty energie, ale způsobuje snížení napětí na elektrickém oblouku a snižuje tedy výkon dodaný do pracovního prostoru pece. Na reaktanci má kromě délky vodičů vliv i vzájemná poloha fází a poloha okolních kovových částí. Bifilárním provedením krátké cesty můžeme podstatně snížit případnou nesymetrii, která by jinak mohla snižovat výkon pece a životnost vyzdívky. Podmínkou provedení bifilárního spojení jsou vhodné vývody sekundárního vinutí pecního transformátoru dosažitelné mimo vlastní transformátor.

V menších pecích, přibližně do 15 MVA realizujeme krátkou cestu pomocí pásoviny s přívodem z ohebných lan, krátká cesta větších pecí bývá z měděných trubek chlazených průtokem vody.



obr. 4.5 – Krátká cesta menší staré obloukové pece

5.1.5 Elektrody

Jsou to konečné části elektrického obvodu pece, jejich tepelné ztráty a opotřebení tvoří velkou část provozních nákladů pece. Hlavní požadavky na elektrody jsou dobrá elektrická vodivost, mechanická pevnost, vysoká oxidační teplota a chemická čistota. Používáme buď uhlíkové, grafitové nebo násypné (Söderbergovy) elektrody. Uhlíkové elektrody se vyrábějí ze směsi antracitu, koksu, přírodního grafitu a pryskyřice vypalováním. Používají se při výrobě uhlíkových ocelí a feroslitin. Grafitové elektrody se vyrábějí z uhlíkových dalším dlouhodobým vypalováním, během kterého se uhlík přemění v grafit. Násypné elektrody se používají při aplikacích vyžadujících větší průměr elektrod (nad 500mm). Směs pro výrobu uhlíkových elektrod se nasype do plechové roury a udusá se přímo nad pracující částí elektrody. Proces vypalování tak probíhá během tavy, což snižuje jejich náklady.

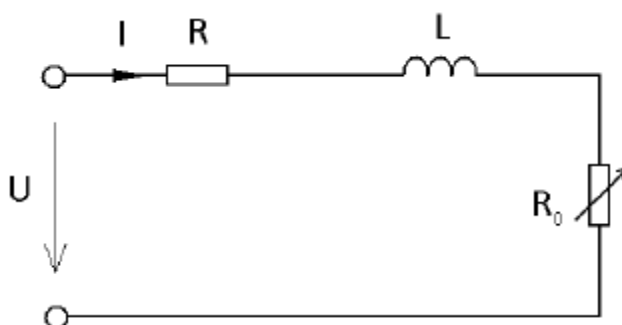
6 Určování režimu elektrické obloukové pece

Určováním režimu elektrické obloukové pece se snažíme udržovat určitý pracovní parametr v požadovaných mezích, například co nejnižší spotřeba elektrické energie, maximální produktivita, minimální provozní náklady atd. K optimalizaci pracovního režimu se používá kružnicový diagram.

Kružnicový diagram EOP je geometrické vyjádření proudu, výkonu, účinnosti a účinníku elektrického oblouku pece. Z diagramu určujeme optimální proud pece a nastavení regulátoru elektrod pro různá napětí. Charakteristiky pro kružnicový diagram získáváme měřením na jedné fázi EOP za předpokladu těchto zjednodušujících podmínek:

- odběr pece je ve všech fázích symetrický
- proud i napětí oblouku mají sinusový průběh
- proud obsahuje jen 1. harmonickou

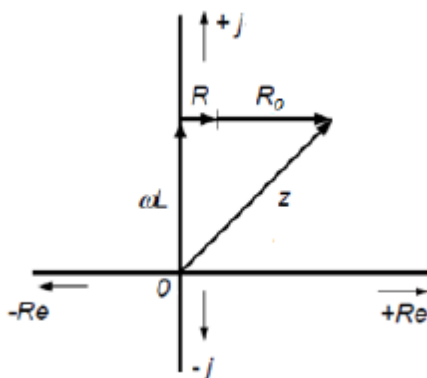
Náhradní schéma obloukové pece pro konstrukci kružnicového diagramu se skládá jen z činného odporu fáze (R), její indukčnosti, která musí zahrnovat i vzájemnou indukčnost mezi fázemi (L) a odporu oblouku R_0 . U je napětí sekundárního vinutí pecního transformátoru. Z tohoto schématu není problém určit proud fází při měnícím se odporu oblouku.



obr. 5.1 – Náhradní schéma jedné fáze EOP

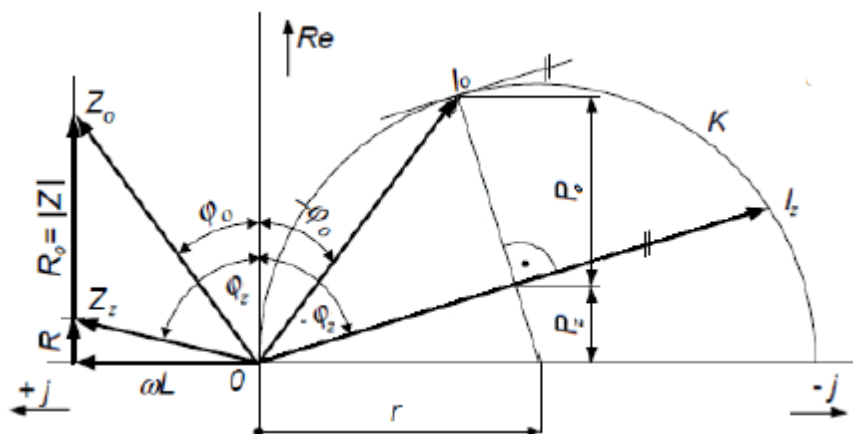
6.1 Kružnicový diagram vycházející z diagramu impedancí

Diagram impedancí je závislost impedance fáze na odporu oblouku



obr. 5.2 – Diagram impedancí fáze

Z tohoto diagramu pak sestojíme kružnicový diagram s průměrem kružnice $d = \frac{U}{\omega L}$.



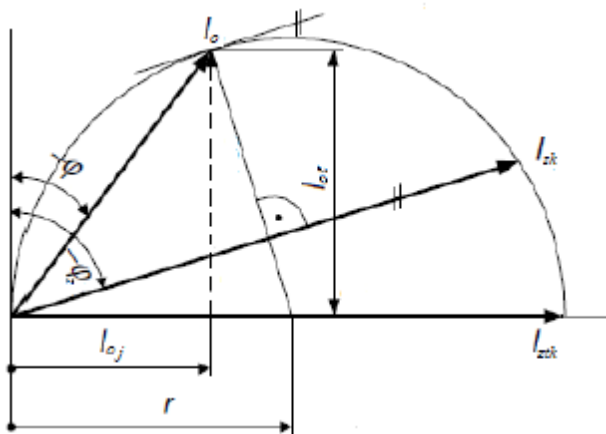
obr. 5.2 – Kružnicový diagram

Fázor proudu se pohybuje po kružnici K a optimálního proudu dosáhneme, pokud se bude odpor oblouku R_0 rovnat impedanci celého přívodu k němu.

6.2 Kružnicový diagram vycházející ze zkratových proudů

Při tomto způsobu konstrukce vycházíme ze znalosti teoretického a skutečného zkratového proudu. (I_{ztk} a I_{zk}). Průměrem kružnice je I_{ztk} a I_{zk} do něj vyneseme pod úhlem odpovídajícím jeho účinníku $\cos\varphi$.

Při nastavování pece na požadovaný pracovní režim musíme provést elektrický a tepelný výpočet, nebo provést měření. Často se vychází z výsledků předchozích taveb.



obr. 5.3 – Konstrukce kružnicového diagramu vycházející ze zkratových proudů

6.3 Určování účinníku $\cos\varphi$

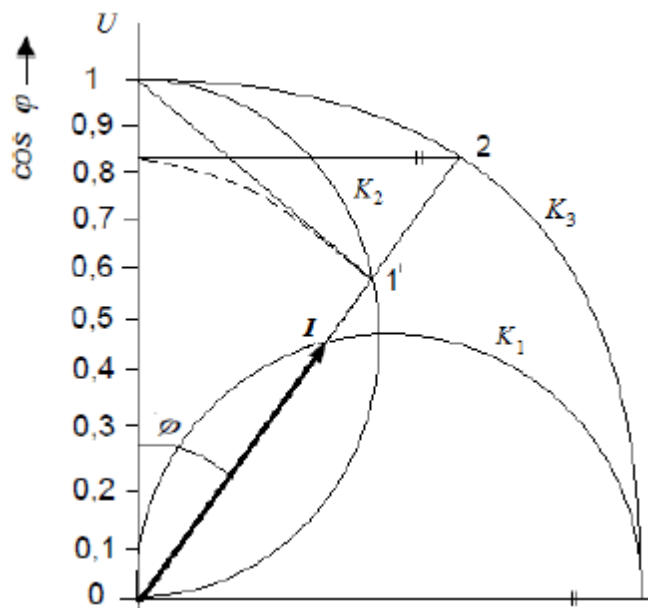
Konstrukce pro účinník lze provést dvěma způsoby.

Vykreslením kružnice K_2 na osu s lineárním měřítkem, proud I ji protíná v bodě 1'. Spojením bodu 1' s koncem lineárního měřítka dostaneme pravoúhlý trojúhelník, účinník získáme změřením úsečky 0-1'.

Při druhém způsobu vykreslíme kružnici K_3 , směrnice proudu I ji protíná v bodě 2. Účinník se rovná délce úsečky kolmé na lineární měřítko mezi touto osou a bodem 2.

6.4 Určování elektrické účinnosti η

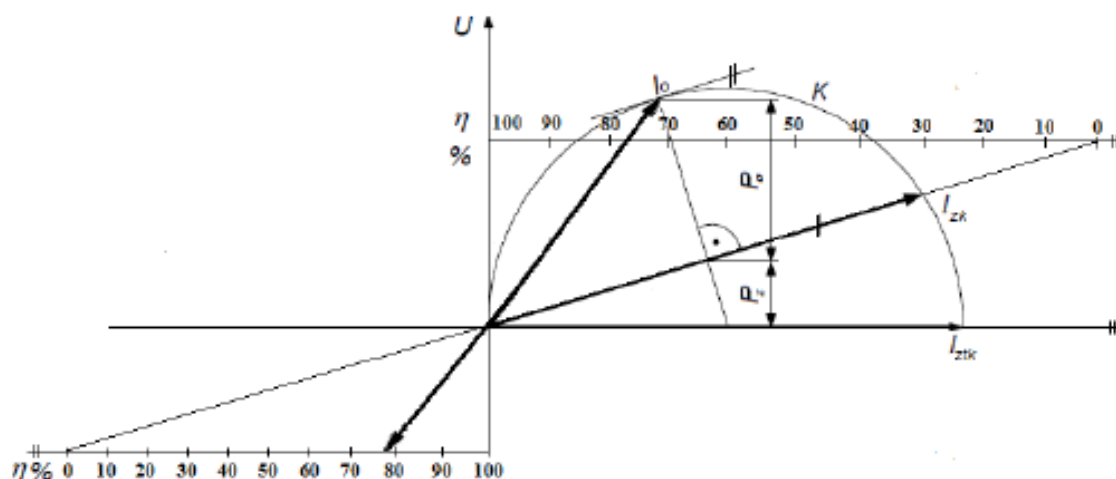
Pro určování účinnosti používáme jednotkovou úsečku rovnoběžnou s teoretickým zkratovým proudem. Průsečík směrnice skutečného zkratového proudu s touto úsečkou označuje účinnost 0%. Průsečík směrnice proudu oblouku označuje přímo elektrickou účinností režimu. Pro lepší přehlednost můžeme zkonstruovat osu účinnosti v opačném kvadrantu, než je kružnicový diagram.



obr. 5.4 – Konstrukce pro určení účinníku

6.5 Pracovní charakteristiky

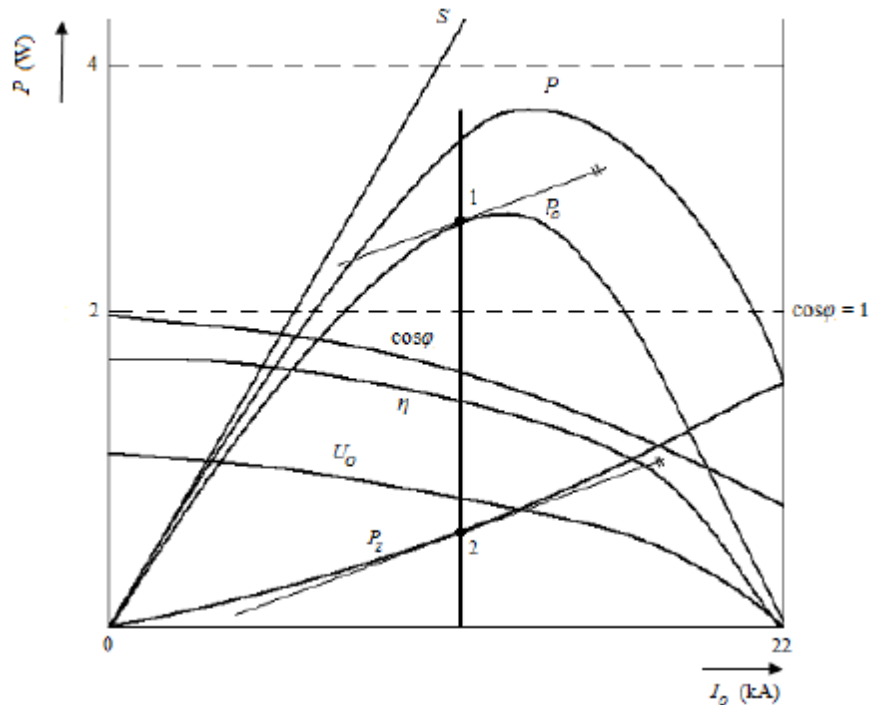
Pracovní charakteristiky získáváme buď z kružnicového diagramu, nebo můžeme tyto parametry získat měřením na peci. Preferujeme naměřené hodnoty, protože měřením na peci získáváme hodnoty pro



obr. 5.5 – Konstrukce pro určení elektrické účinnosti

pracovní charakteristiky i pro kružnicový diagram, které pak můžeme porovnávat s již sestrojeným diagramem. Pracovní charakteristiky vykrešlují závislost důležitých parametrů na proudu oblouku. Tyto hodnoty jsou:

- činný výkon oblouku P_0
- činný výkon pece P
- ztrátový výkon pece P_z
- účinník $\cos\varphi$
- elektrická účinnost η
- zdánlivý výkon S

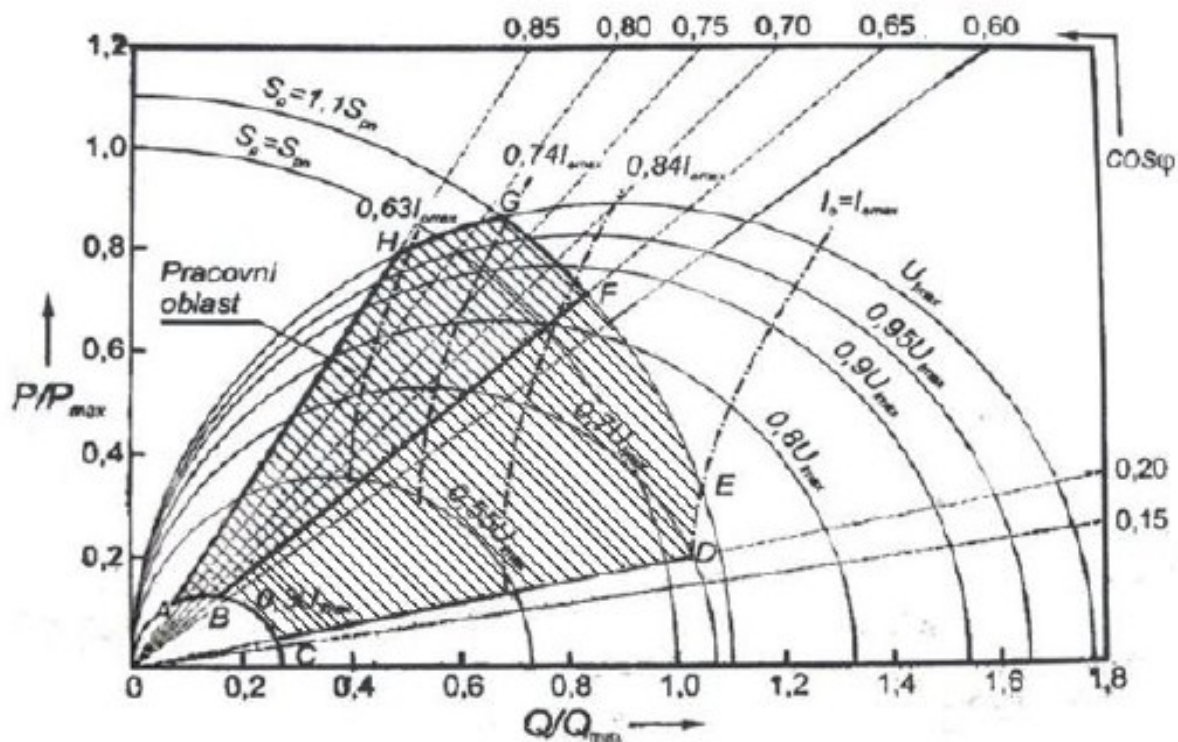


obr. 5.6 – Pracovní charakteristiky EOP

Pomocí těchto charakteristik můžeme vyznačit oblast proudu oblouku, kdy budou ostatní parametry pece zůstat v požadovaných mezích. Optimální I_o hledáme tak, aby se tečny k průběhům výkonu na oblouku a ztrátového výkonu co nejvíce blížily rovnoběžkám. a aby rozdíl mezi P_0 a P_z byl co největší. Kolmá spojnice těchto bodů pak určuje optimální proud oblouku.

6.6 Pracovní oblast kružnicového diagramu

Kružnicový diagram často využíváme pro vymezení pracovní oblasti EOP. Často ji vykresluje pro několik stupňů napětí najednou. Na osy vynášíme poměrné hodnoty činného a jalového výkonu, které znázorňují účinník. Na osy dále zaneseme jmenovitý zdánlivý výkon S_p a maximální zdánlivý výkon S_o .



obr. 5.7 – Pracovní oblast kružnicového diagramu

Teoretická pracovní oblast je vyznačena body A-B-C-D-E-F-G-H-A. Zdola pracovní oblast omezuje nejnižší napětový stupeň (A-B-C), zprava dovolenou proudovou hodnotou oblouku (D-E) a účinnkem zkratového proudu, kdy výkon oblouku pokrývá jen tepelné ztráty (C-D). Shora pracovní oblast omezuje maximální zdánlivý výkon (E-F-G) a nejvyšší napětový stupeň (G-H). Zleva ji pak omezuje maximální účinník proudu ($\cos\varphi=0,85$) (H-A). Kdybychom tuto hodnotu překročili, oblouk by přestal být stabilní. Reálná pracovní oblast je omezena zespoda hodnotou účinníku $\cos\varphi=0,65$ a je tedy vyznačena body (A-B-F-G-H-A).

7 Metody intenzifikace taveb

7.1 Kyslíkovo-palivové hořáky

Tyto hořáky jsou již prakticky standardní výbavou obloukových pecí a zvyšují jejich produktivitu o 5-20%. Hořáky pomáhají natavení vsázky a zmenšují studené oblasti. Tím se zvyšuje rovnoměrnost a rychlost tavby. Většina pecí má několik hořáků. Jejich použití představuje citelné úspory. Snižují náklady za elektickou energii a elektrody, přičemž využívají jako palivo zemní plyn, který je velice levným zdrojem energie.

Hořáky bývají umístěny na boční stěně, víku, nebo struskových dveřích pece. Dveřní hořák používají pece pro menší vsázku, kde může jeden hořák pokrýt všechna chladnější místa. Výhodou takového provedení je, že lze hořáky odstranit, pokud se nepoužívají. U větších pecí používáme několik hořáků namontovaných po obvodu boční stěny pro rovnoměrné vytápění. Může však dojít k poškození struskou, zejména pokud se používá pěnivá struska. V takových případech je lepší používat hořáky instalované do víka pece.

Přenos tepla do strusky probíhá hlavně konvekcí ze spalín a sáláním produktů hoření. Tyto děje jsou silně závislé na rozdílu teplot mezi vsázkou a plamenem a na ploše vsázky vystavené teplu. Hořáky jsou tedy neúčinnější na začátku tavby, než se vsázka zahřeje. V důsledku roztavení vsázky také dojde ke zmenšení její plochy. Z těchto důvodů zastavujeme práci hořáků před ukončením tavby, přibližně v polovině tavící periody, pak mají hořáky příliš nízkou účinnost. Problematický je také fakt, že po zahřátí vsázky, dochází k reakci železa s vodou, která vzniká jako produkt spalování oxidu železitého a

vodíku. To způsobuje ztráty a vodík musíme spalovat v proudu odtahových spalin. Doba, kdy bychom měli odstavit hořáky je tedy určena i zvýšením teploty odtahových spalin.

Přebytečný kyslík v peci může reagovat s materiálem vsázky. Pokud je vsázkou železo, nebo jeho slitiny, jedná se o nežádoucí reakci snižující účinnost pece. Bezprostředně po vsazení, před zapnutím elektrického oblouku, mohou těkavé a hořlavé materiály ve vsázce reagovat s kyslíkem za vzniku tepla, což přináší jisté energetické úspory. Účinnost hořáků se pohybuje v rozmezí 45-65 %.



obr. 6.1 – Kyslíko-palivový hořák během tavby

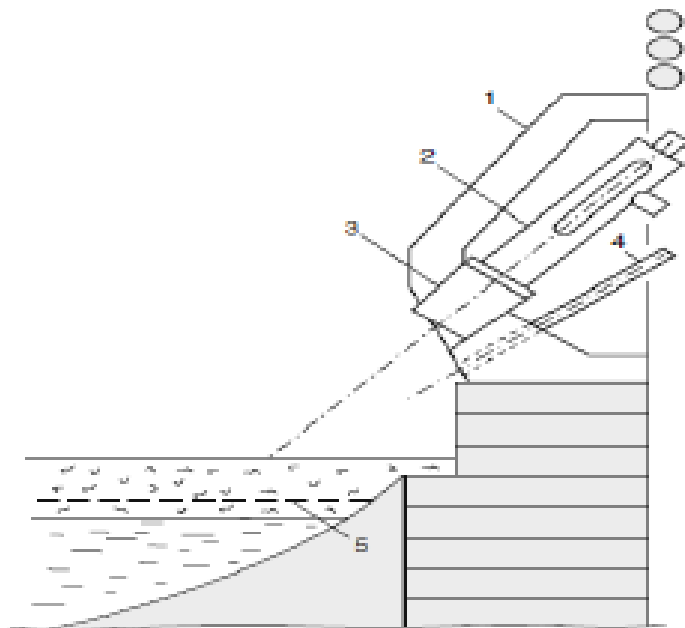
7.2 JET moduly

JET moduly jsou multifunkční kyslíko-plynové hořáky, které lze použít k ohřevu vsázky, dmýchání kyslíku do lázně a dmýchání uhlíku do taveniny pro napěnění strusky a redukci FeO. Modul bývá obvykle umístěn ve vodou chlazeném boxu, který ho chrání jak před teplem, tak před mechanickým poškozením vsázkou. Tyto boxy jsou umístěny v otvorech v bočních panelech pro co nejnižší vzdálenost trysek od povrchu vsázky či lázně, se zvyšující se vzdáleností klesá účinnost modulu. Tato vzdálenost by neměla přesáhnout 700 mm.

Modul můžeme provozovat ve dvou režimech. Prvním je režim hořáku pro ohřev vsázky, jeho maximální výkon je 4 MW. Směs plynu a kyslíku částečně hoří ve spalovací komoře, na výstupu z ní se tvoří plamen o vysoké teplotě, který intenzivně zahřívá a taví materiál před vývodem hořáku. Spalovací komora chrání trysky hořáku před ucpáním rozstříkovaným kovem a struskou. Ve druhém režimu modul používáme jako dmýchací zařízení lázně. V tomto režimu je značně snížen přívod plynu a výrazně zvýšen přívod kyslíku. Vytvoří se dlouhý nadzvukový proud kyslíku. Funkce hořáku je omezena na zachování malého udržovacího plamene s nízkou spotřebou zemního plynu. Plamen je zakryt proudem kyslíku, který zvyšuje jeho dosah a zabraňuje vniknutí zpěněné strusky do prostoru spalovací komory a ucpání trysek.

Přepínání režimu je řízeno počítačem. První režim nabíhá bezprostředně po vsazení a do druhého se přepíná po několika minutách. Vsázka natavená prvním režimem umožňuje snadnější proniknutí kyslíku vsázkou k roztavenému kovu na dně pece. To zajišťuje včasné zahájení dmýchání kyslíku do tekutého kovu, což zvyšuje produktivitu pece. S přidáváním další vsázky se režimy hořáků neustále střídají, což zvyšuje účinnost dmýchání, dokud se nevytvoří lázeň. Pak už moduly pracují pouze v režimu dmýchání.

Spolehlivost těchto modulů je závislá na odolnosti jejich ochranných boxů a nástěnných panelů. Ty působí ve velice náročných podmínkách blízko lázně. Boxy jsou často poškozeny proudem kyslíku odraženým od vsázky. Riziko takového poškození sice snižuje střídání pracovních režimů, nevylučuje ho však úplně. Pro snížení rizika poškození můžeme modul nainstalovat do vyšší výšky za cenu mírného snížení účinnosti.



obr. 6.2 – Schéma konstrukce JET modulu

1-vodou chlazený měděný blok, 2-kyslíkový hořák, 3-vodou chlazená spalovací komora, 4-potrubí pro injektáž práškového uhlíku

7.3 Dospalování CO v peci

Dospalování znamená spalování jakýchkoliv částečně spálených sloučenin. Ztráty tepla odchozími spalinami z pece mohou představovat až 20% produkovaného tepla. Odchozí spaliny mají vysokou teplotu a jejich teplo lze dále využívat, například k přehřívání vsázky. Tím sice využijeme teplo spalin, ale ne jejich kalorické teplo, které představuje až 60 % jejich energie.

Plyn CO ve velké míře produkuje kyslíkové trysky hořáků v pecích, pěnivá struska a surové železo ve vsázce. Na začátku tavby také produkuje značné množství CO spalování olej, mastnoty a dalších nečistot na povrchu vsázky. Teplo produkované při spalování CO na CO_2 je třikrát větší než při spalování C na CO. Dospalování CO tedy představuje značný potenciální zdroj tepla pro pec. Úspora energie z dospalování může dosáhnout až $72 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1}$. Při dospalování CO nad lázní přechází teplo hoření přímo do ní. Současným trendem je rostoucí využívání kyslíku pro úsporu elektrické energie při tavbě, což přirozeně zvyšuje i produkci CO.

Existuje několik možností dospalování v peci. Můžeme foukat kyslík do pece nad struskou, CO se tak dospaluje nad lázní. Kyslík můžeme také foukat do strusky, CO se pak dospaluje ještě před vstupem do volného prostoru v peci. Přenos tepla se pak děje prostřednictvím pohybu strusky. Dospalovací kyslík se zavádí do strusky nízkou rychlostí. Dalším způsobem je půdní dmýchání kyslíku přes kámen usazený v nížěji pece spojený s foukáním malého množství kyslíku do pece.

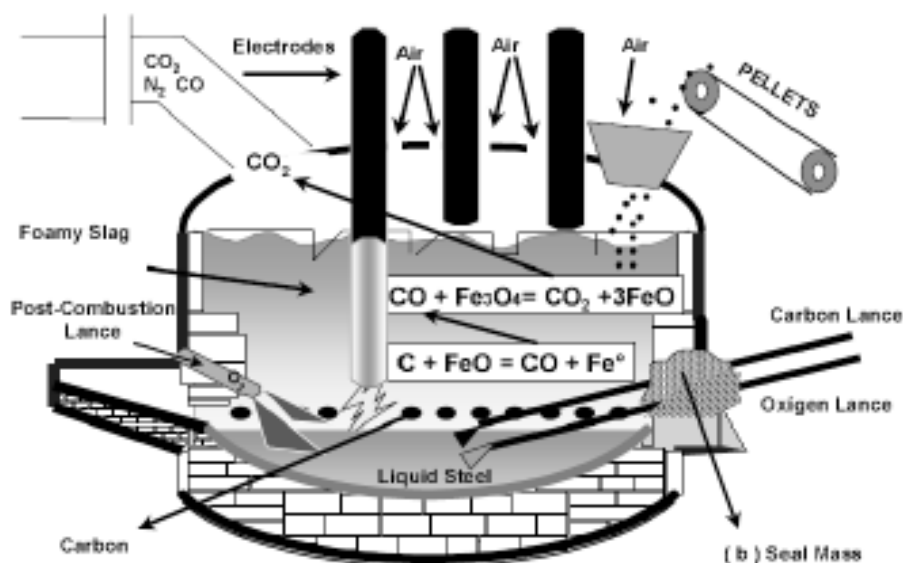
7.4 Technologie Closed Door Process

Při tomto procesu se využívá předredukované rudy, která je nepřetržitě dávkována do pece. Ztráty se snižují pomocí pěnivé strusky, dosahující 1,5 – 2 m. Před úplným roztavením vsázky se dveře pece uzavřou a zvýší se hladina pěnivé strusky, někdy až po víko pece. Pak nepřetržitě přidáváme předredukovanou rudu za maximálního výkonu pece.

Pro lepší využití tepla odcházejících spalin se ponořuje do pěnivé strusky dospalovací tryska, což umožňuje řízený přenos tepla do strusky, která ho předává předredukované rudě. Při procesu je důležitý obsah železa ve strusce. Běžně slévaná struska obsahuje 4 – 8 % FeO. Jeho nízký obsah ve strusce znamená vyšší využití kovu, řidká struska je také šetrnější k vyzdívce pánví.

Výhody procesu: Vyšší výrobnost, rychlejší sázení rudných pelet, delší kampaň pece a životnost licích pánví, optimální spotřeba elektrod a výrobnost pece v důsledku dlouhého oblouku, efektivnější dospalování spalin, nižší hluk a méně prachu, páry železa vznikající v oblasti oblouku kondenzují ve studené strusce, vyšší celková tepelná účinnost

Nevýhody procesu: Obtížné tavení materiálu s vysokým obsahem fosforu, nebezpečí přetečení strusky přes klenbu pece, možné přetížení transformátoru a poškození elektrod, obtížné měření reálné výšky strusky, struska může poškodit chladicí panely a klenby elektrod.



obr. 6.3 – Schéma technologie closed door

7.5 Technologie pěnivé strusky

Proces spočívá v injekci uhlíku do strusky, kde reaguje s FeO za vzniku bublin CO, které napění strusku. Pěna může mít malé i velké bubliny. Malé bubliny jsou stabilnější a vznikají chemickými reakcemi. Nestálé velké bubliny se vytváří při vstřikování plynů. Pro správné pění je zapotřebí dostatečná vrstva husté strusky, která ale nemusí vzniknout vždy. Měří se tzv. index pění, který udává čas potřebný k průchodu plynu struskou. Index pění je závislý na viskozitě strusky a velikosti bublin. Ke konci tavícího procesu je pění méně stabilní a výška pěny se snižuje. To je způsobeno postupně se snižujícím obsahem FeO ve strusce.

Pro zajištění efektivity procesu je potřebná vsázka s vysokým obsahem železa a injekce velkého množství uhlíku a kyslíku. Výška napěněné strusky je omezena pouze objemem pece. Na konci procesu se tato struska rozpadá v důsledku nižšího obsahu FeO. Při nižším obsahu železa ve strusce, či menším množství injektovaného uhlíku a kyslíku může výška pěnivé strusky stále dosáhnout maxima, je však omezena množstvím strusky a rychleji se rozpadá. Je také důležité, aby se do strusky vstříkovalo správné

množství kyslíku. Málo kyslíku má za následek nižší obsah FeO ve strusce, což vede k nižší produkci bublin CO. Příliš mnoho FeO zase znamená snížení indexu pění a výnosu železa.

8 Metody úspory energie během tavby

8.1 Zlepšení regulace tavby

Regulací tavby se optimalizuje tavební proces, což může vést ke značnému snížení spotřeby elektrické energie. Moderní kontrolní a měřicí systémy monitorují v reálném čase provozní parametry jako teplota lázně a množství uhlíku.

Sledováním množství a složení produkovaných plynů můžeme zlepšit využití chemické energie. Detailní měření dospalování plynů se provádí pomocí optického senzoru. Na základě těchto dat pak může kontrolní systém redukovat dospalování v reálném čase. Bylo dokázáno, že pokud kontrolujeme vstřikování kyslíku pro dospalování na základě dat o koncentraci CO a CO₂ v reálném čase, můžeme navýšit tepelnou energii získanou dospalováním až o 50% ve srovnání se vstřikováním založeným na přednastavených hodnotách. Výhody této metody mohou být:

- nižší spotřeba elektrické energie
- kratší doba spotřeba elektrické energie
- vyšší produktivita pece
- nižší výrobní náklady
- nižší spotřeba elektrod
- nižší plynné emise
- menší namáhání tepelné izolace

8.1.1 Příklady z praxe

Systém pro průběžné měření CO, CO₂, H₂, a O₂ pro regulaci dospalování byl instalován v Hylsa's Planta Norte (Mexico) a ve firmě Nucor (Seattle). Zavedení systému vedlo ke snížení spotřeby elektrické energie o 2 a 4 %, zvýšení spotřeby produkovaných plynů o 8 a 16%, snížení spotřeby kyslíku o 5 a 16 % a snížení spotřeby injektovaného uhlíku o 18 % v obou případech. Výnos přitom narostl o 1 a 2 %, spotřeba elektrod se snížila až o 16%, zatímco produktivita pecí vzrostla o 8%.

V Tamsa, Veracruz (Mexico) byl revidován celý systém vstřikování paliva v letech 2002 a 2004. Byl nainstalován nadzvukový systém vstřikování společně se systémem pro měření a regulaci vstřikování paliva. Spotřeba elektrické energie se tak snížila o 12 – 33%, zatímco spotřeba kyslíku a uhlíku vzrostla o 11 – 15 %. Spotřeba elektrod se snížila o 9%.

8.2 Zvýšení výkonu

Ztráty na pecním transformátoru mohou dosáhnout až 7% odebírané energie. Tyto ztráty závisí hlavně na velikosti a stáří transformátoru. Převedení pracovního režimu pece na vyšší výkon, jmenovitě režim UHP (ultra high power), snižuje ztráty a zároveň zvyšuje produktivitu pece. Zvýšeného výkonu se dosahuje výměnou starých transformátorů, nebo jejich paralelním spojením s novými. Přechod na UHP může znamenat značné zvýšení generovaného tepla a namáhání tepelné izolace, proto je třeba zároveň zlepšit systém chlazení, aby nedocházelo k tepelným ztrátám snižujícím úspory energie. Energetické úspory jsou přibližně 1 kWh/t na 1 MW zvýšení výkonu.

8.2.1 Příklady z praxe

Ugine Ardoise (Francie) implementovala nové transformátory na dvě své obloukové pece s celkovou investicí \$1,1 milionu na vylepšení transformátorového systému. Provozní napětí se zvýšilo z 600 na 660 V v jedné peci a ve druhé ze 400 na 538 V. Tím se zvýšil výkon dodávaný elektrodami u obou pecí. Dodatečné chlazení bylo realizováno ostřikováním elektrod. Zvýšený výkon vedl ke zkrácení doby tavby o 7 minut u jedné a 14 minut u druhé pece, díky čemuž se průměrná produkce zvedla o 8 a 7 tun oceli za hodinu. Spotřeba elektrod se snížila o 0,1 a 0,5 kg na tunu oceli a spotřeba elektrické energie

klesla o 10 a 20 kWh na tunu oceli. V důsledku nového systému se také zvýšila reaktance krátké cesty, což vedlo ke stabilizaci oblouku.

8.3 Adjustable speed drives (ASD)

Protože se množství produkovaného odpadního plynu v průběhu tavby značně mění, používají se ASD k efektivnějšímu řízení lapačů prachu. Úspora energie může dosáhnout až 15 kWh na tunu. Zavedením těchto systémů se sníží množství zachyceného prachu o 2–3 %, spotřeba elektrické energie lapačů však klesá o 67 %.

8.4 Míchání u dna pomocí plynu

Během tohoto procesu se vstřikuje inertní plyn (například Argon) na dno pece pro rovnoměrnější rozložení tepla v tavenině. Mícháním lázně můžeme dosáhnout úspory elektrické energie až 22 kWh na tunu. Míchání také usnadňuje chemické reakce v tavenině, což může přinést zvýšení výnosu až o 0,5 %. Pece, v nichž už funguje systém vstřikování kyslíku, jsou dostatečně míchány tímto systémem.

8.5 Vstřikování odpadu

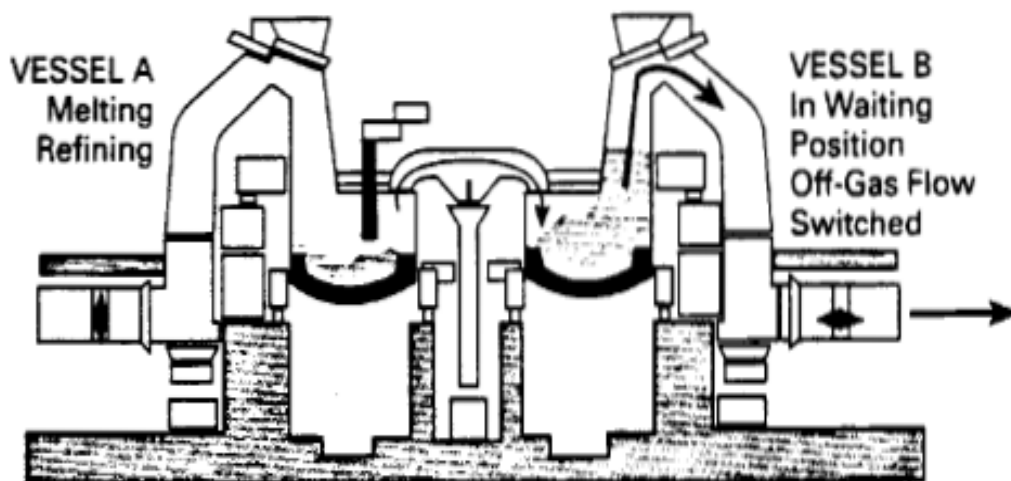
Bylo dokázáno, že plastový odpad může být vstřikován do obloukové pece jako palivo. Při používání polyethylenového odpadu jsme schopni nahradit 30% koksu a uhlí používaného v obloukových pecích. Tato metoda dokáže urychlit proces napětí strusky a tak ušetřit elektrickou energii a zkrátit dobu tavby, čímž dosáhneme vyšší produktivity. Vstřikováním plastového odpadu také snižujeme emise CO₂. Energetická úspora může být až 11 kWh na tunu plastového paliva.

Do roku 2007 byla tato metoda pouze testována v malém měřítku na University of New South Wales. První zkušební komerční provoz byl spuštěn držitelem patentu, firmou Onesteel v Austrálii. Zkušební provoz potvrdil urychlení procesu napětí strusky za snížené doby tavby a spotřeby elektrické energie.

Kromě plastového odpadu lze jako palivo použít také staré pneumatiky. Provozní testy v Belgii a Francii ukázaly, že při opatrném vsázení a správné kontrole uhlíku můžeme použít 8-12 kg pneumatik na tunu železa.

8.6 Předhřívání vsázky

Tato metoda spočívá ve využívání odpadního tepla obloukové pece k předehřívání příští vsázky. To se děje buď v zásobníku vsázky, v nakládací šachtě, nebo na speciálním dopravníku umožňujícím průběžné vsázení do pece. V single shaft pecích můžeme předehřívát jen asi 50 % vsázeného materiálu, zatímco finger-shaft pece umožňují předehřívání veškeré vsázky. Další modifikací jsou double shaft pece, což je v podstatě spojení dvou jednoduchých pecí obsluhovaných jednou sadou elektrod.

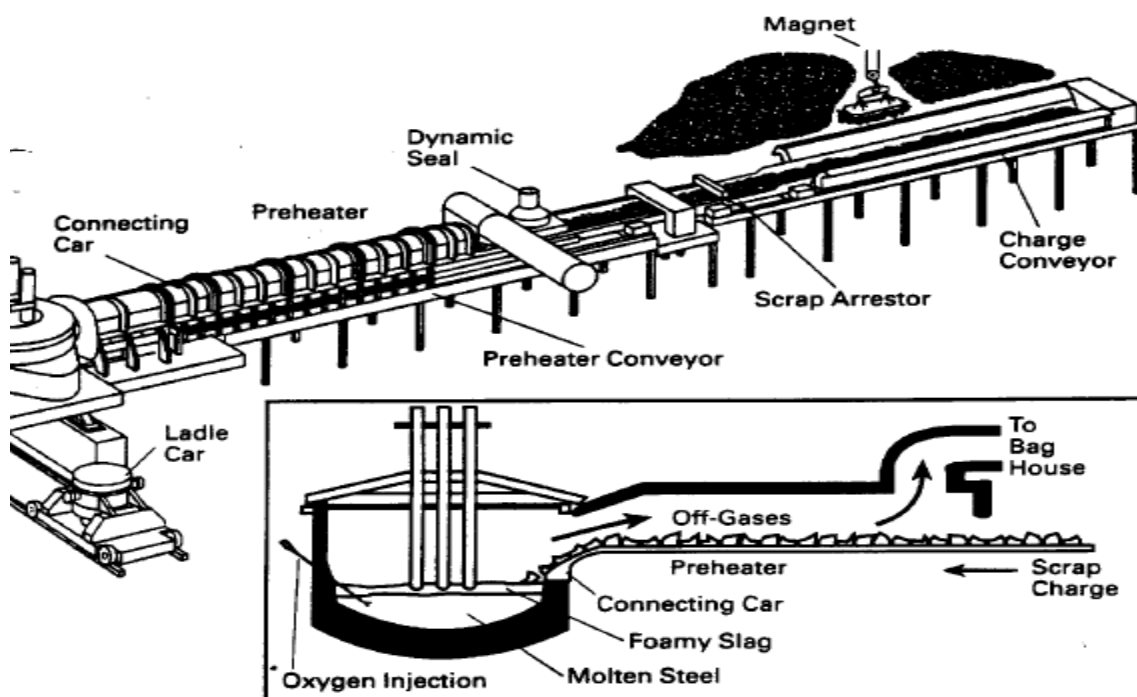


obr. 7.1 – Schéma double shaft pece

U single shaft pecí může předehřívání vsázky ušetřit až 70 kWh na tunu tekuté oceli. Finger-shaft pec dosahuje úspor až 100 kWh na tunu, což může být i 25% celkového odběru elektrické energie. Tyto úspory závisí na druhu vsázky a stupni dospalování splodin. U finger-shaft pecí se čas tavby zkracuje až o 15 minut.

8.6.1 Metoda Consteel

Metoda Consteel se sestává z dopravníkového pásu na vsázku, procházejícího předehřívacím prostorem. Tím prochází horké plyny z pece. Po průchodu tímto prostorem se vsázka dosává na spojovací dopravník, který vstupuje do stěny pece a vhadzuje do ní vsázku. Tento způsob ohřívá vsázku až na 316°C. V peci je stálá hladina horkého kovu a oblouk slouží k jeho udržení v tekutém stavu. Výhodami této metody jsou nízká spotřeba elektrické energie (asi 360 kWh na tunu), nízká spotřeba elektrod, nižší vliv harmonických a flickeru na síť, menší produkce prachu a hluku.



obr. 7.2 – Předehřívání vsázky metodou consteel

8.7 Vzduchotěsný provoz

Během provozu EOP do ní vstupuje velké množství vzduchu (kolem 30 000 Nm³ u standardní pece na 165 tun s dobou tavby 1 h. Tento vzduch má venkovní teplotu. Dusík a nereaktivní plyny v něm jsou v peci ohřívány a odcházejí společně s výpary z tavby za teploty kolem 1000°C, což způsobuje značné tepelné ztráty. Během testů v malém měřítku s pecí na 7 tun v Arcelor Research bylo dosaženo úspor 100 kWh na tunu u pece, jež měla spotřebu 450 kWh na tunu při vzduchotěsné tavbě s využitím dospalování a kontroly vypouštěných plynů. Asi 80 % těchto úspor můžeme přiřadit snížení tepelných ztrát z výparů. Zbývajících 20% je díky snížené době tavby. Plyn vycházející z pece lze použít jako palivo pro dospalování, čímž ušetříme za zemní plyn, jež se běžně používá.

9 Závěr

V současnosti se výroba v elektrických obloukových pecích orientuje na snižování spotřeby elektrické energie. Toho se dosahuje přidavnými zdroji tepla, jako jsou kyslíko-palivové hořáky, nebo dospalování splodin z tavby. Další možností úspory je efektivnější využívání produkovaného tepla, například k přehřívání vsázky, nebo snížení tepelných ztrát pomocí pěnivé vsázky. Možnosti intenzifikace taveb a úspory elektrické energie bývají často shodné, protože rychlejší tavba je energeticky výhodnější.

Použitá literatura:

- [1]. DEJL, Jaromír a Edgar WÜNSCHE. *Elektrické obloukové pece*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [2]. HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektrotepelná zařízení*. Vyd. 1. Praha: IN-EL, 1997. Knižnice Elektro. ISBN 80-902333-2-5.
- [3]. HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [4]. WORREL, Ernst, Paul BLINDE, Maarten NEELIS, Eliane BLOMEN, and Eric R. MASANET. *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers*. Lawrence Berkley National Laboratory, 2010. LBNL-4779E
- [5]. MIKULINEC, R. *Optimalizace provozu elektrických obloukových pecí: bakalářská práce*. Brno: Vysoké Učení Technické v Brně, 2011.
- [6]. TUPÝ, T. *Možnosti intenzifikace tavebního procesu v elektrické obloukové peci pomocí kyslíku: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB-Technická Univerzita Ostrava, 2012.

Seznam obrázků:

<i>obr. 2.1 – Charakteristika střídavého oblouku bez indukční zátěže</i>	<i>4</i>
<i>obr. 2.2 – Charakteristika střídavého oblouku stabilizovaného indukčností</i>	<i>4</i>
<i>obr. 3.1 – Schéma pecí s nevodivou a s vodivou nístějí</i>	<i>5</i>
<i>obr. 3.2 – Schéma pece s nepřímo působícím obloukem</i>	<i>6</i>
<i>obr. 4.1 – Základní části elektrické obloukové pece</i>	<i>7</i>
<i>obr. 4.2 – Elektrický obvod EOP</i>	<i>8</i>
<i>obr. 4.3 – Blokové schéma nepřímé a přímé kompenzace jalového výkonu</i>	<i>9</i>
<i>obr. 4.4 – Porovnání výkonu při běžné a UHP tavbě</i>	<i>10</i>
<i>obr. 4.5 – Krátká cesta menší staré obloukové pece</i>	<i>11</i>
<i>obr. 5.1 – Náhradní schéma jedné fáze EOP</i>	<i>12</i>
<i>obr. 5.2 – Diagram impedancí fáze</i>	<i>12</i>
<i>obr. 5.2 – Kružnicový diagram</i>	<i>13</i>
<i>obr. 5.3 – Konstrukce kružnicového diagramu vycházející ze zkratových proudů</i>	<i>13</i>
<i>obr. 5.4 – Konstrukce pro určení účinníku</i>	<i>14</i>
<i>obr. 5.5 – Konstrukce pro určení elektrické účinnosti</i>	<i>14</i>
<i>obr. 5.6 – Pracovní charakteristiky EOP</i>	<i>15</i>
<i>obr. 5.7 – Pracovní oblast kružnicového diagramu</i>	<i>16</i>
<i>obr. 6.1 – Kyslíko-palivový hořák během tavby</i>	<i>17</i>
<i>obr. 6.2 – Schéma konstrukce JET modulu</i>	<i>18</i>
<i>obr. 6.3 – Schéma technologie closed door</i>	<i>19</i>
<i>obr. 7.1 – Schéma double shaft pece</i>	<i>22</i>
<i>obr. 7.2 – Přehřívání vsázky metodou consteel</i>	<i>22</i>